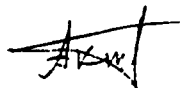


0 -800092

На правах рукописи



**АКТУГАНОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ**

**ТОНКОСТЕННАЯ МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННАЯ  
ДВУТАВРОВАЯ БАЛКА С РЕБРАМИ ЖЕСТКОСТИ  
В ВИДЕ ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГОФРОВ**

**05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Казань - 2013**

**Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет»**

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент,  
**Котлов Виталий Геннадьевич**

**Официальные оппоненты:** **Жаданов Виктор Иванович**,  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО «Оренбургский государствен-  
ный университет», профессор кафедры  
«Строительные конструкции»

**Хисамов Рафаиль Ибрагимович**, кандидат  
технических наук, профессор ФГБОУ ВПО  
«Казанский государственный архитектурно-  
строительный университет», профессор  
кафедры «Металлические конструкции и  
испытание сооружений»

**Ведущая организация** ФГБОУ ВПО «Нижегородский государ-  
ственный архитектурно-строительный уни-  
верситет»

Защита состоится «8» апреля 2013 г. в 15.00 час. на заседании  
диссертационного совета Д 212.077.01 при Казанском государственном  
архитектурно-строительном университете по адресу: 420043, г. Казань,  
ул. Зеленая, д. 1, ауд. 3-203 (зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО  
«Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

Автореферат разослан «6» марта 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

АБ-- Л.А.манова Л.А.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000672111

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время быстрыми темпами развивается коттеджное и малоэтажное строительство. В несущих конструкциях каркаса, покрытий и перекрытий таких зданий широко применяются тонкостенные стальные профили или конструкции из древесины. Каждая из этих стальных и деревянных конструкций имеет свои преимущества и недостатки, например, по несущей способности, жесткости, звукопроницаемости, теплотехническим, и прочим свойствам. Это способствует расширению рынка новых строительных конструкций, обладающих рядом конструкционных качеств, которые обеспечивают сохранение несущей способности при снижении массы конструкции, уменьшение срока строительства, повышение энергоэффективности и снижение эксплуатационных расходов. Из этого вытекает целесообразность сочетания в несущих конструкциях при пролетах более 6 м наиболее положительных эффективных свойств металла и древесины за счет их оптимального конструктивного комбинирования. Одной из таких конструкций является двутавровая балка, пояса которой выполнены из древесины, а стенка – из тонколистовой оцинкованной стали, в которой выштампованы гофры полуцилиндрической формы. Сочетание указанных материалов в конструкциях балки вызывает вопросы, связанные с их совместной работой и требует проведения исследований по разработке методики расчета, экспериментальному исследованию их действительной работы и оценке технико-экономических преимуществ. Поэтому разработка методики расчета и исследование работы тонкостенных металлодеревянных балок и напряженно-деформированного состояния является актуальной задачей.

**Целью работы** является создание нового конструктивного решения и методики расчета напряженно-деформированного состояния тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофров, с экспериментальной проверкой теоретических положений.

Поставленная цель достигается на основе решения следующих задач:

- анализа существующих методик расчета и выявления недостатков существующих конструктивных решений тонкостенных деревянных и металлических двутавровых балок;
- численным исследованием напряженно-деформированного состояния (НДС) балки и получением аналитической методики расчета, с уточнением существующих положений расчета несущей способности и жесткости;

- Научная новизна работы** заключается в следующем:

- Достоверность результатов** обеспечена применением апробированных численных методов решения и экспериментальными результатами, согласованными с «Рекомендациями по испытанию деревянных конструкций». Применением теории планирования и математической статистики при обработке экспериментальных данных.

- разработана методика расчета несущей способности предложенного конструктивного решения;
- разработаны рекомендации по расчету и конструированию тонкостенных металлодеревянных двутавровых балок.

**На защиту выносятся:**

- результаты анализа методик расчёта деформаций и напряжений тонкостенных двутавровых балок;
- конструкция тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки, подтвержденная патентами РФ (№238285, № 2441120);

- алгоритм численного расчета напряженно-деформированного состояния тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофров;
- аналитическая методика определения напряженно-деформированного состояния тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки с учетом особенностей конструктивного решения;
- результаты экспериментальных исследований действительной работы тонкостенных металлодеревянных двутавровых балок, подтверждающие основные теоретические положения.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты выполненных исследований доложены на научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава МарГТУ (ныне ПГТУ) (г. Йошкар-Ола в 2008-2012 г.), международной научно-технической конференции «Строительная наука 2010» (г. Владимир, 2010 г.), научно-практической конференции «Современные деревянные конструкции. Теория. Практика. Эксперимент» (г. Санкт-Петербург, 2010 г.), Всероссийской междисциплинарной научной конференции: «Пятнадцатые Вавиловские чтения – Россия в глобальном мире: вызовы и перспективы» (г. Йошкар-Ола, 2011г.), международных научных молодежных конференциях по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2008-2011 г.), на 64-й Всероссийской научной конференции (г. Казань, 2012 г.), международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012» (г. Одесса, 2012 г.), международной конференции «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции» (г. Чебоксары, 2012 г.).

#### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 18 работ, в том числе две научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Новизна технических решений подтверждена двумя патентами РФ: № 2382855 «Металлодеревянная двутавровая балка», № 2441120 «Металлодеревянная двутавровая балка».

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений. Работа изложена на 151 листе машинописного текста, содержит 4 таблицы, 81 рисунок в виде графиков, схем, фотографий и 4 приложения. Список литературы включает 155 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в работе доктору технических наук, профессору Кузнецову Ивану Леонидовичу, а также коллективу кафедры «Металлические конструкции и испытание сооружений» Казанского государственного архитектурно-строительного универ-

ситета за ценные советы, учтенные при выполнении диссертационной работы.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены ее значение и направленность. Дана общая характеристика работы, сформулированы цель и задачи исследования.

**Первая глава** посвящена анализу опыта применения и исследования способов совершенствования конструктивных форм и методов расчета деревянных и тонкостенных металлических двутавровых балок различных конструктивных решений.

В результате исследования установлено, что в современном строительстве используются различные типы тонкостенных металлических двутавровых балок, которые можно отнести к двум основным группам (металлические балки с гибкой стенкой и металлические балки с гофрированной стенкой). Деревянные балки, в свою очередь, подразделяются на клееные балки, клефанерные балки, брусчатые балки на пластинчатых нагелях. При этом каждая группа имеет свои преимущества и недостатки.

В исследование и совершенствование конструкций деревянных двутавровых балок значительный вклад внесли Г. Г. Карлсен, В. С. Деревягин, В. В. Большаков, М. Е. Каган, Г. В. Свенцицкий, В. М. Коченов, Д. А. Кочетков, В. Е. Шишкин, В. Ф. Иванов, П. А. Дмитриев, В. И. Жаданов, И. С. Инжутов, А. И. Отрешко, А. К. Наумов, В. Г. Котлов, В. Ю. Шуко, С. И. Рощина, Ю. М. Иванов, Ф. П. Белянкин и др.

В исследовании и совершенствовании конструкций, а также методик расчета тонкостенных металлических двутавровых балок отмечена значительная роль Д. И. Журавского, С. П. Тимошенко, Н. С. Стрелецкого, А. И. Балабуха, Б. М. Броуде, Б. Б. Лампси, Е. И. Беленя, И. Л. Кузнецова, В. В. Горева, А. Л. Васильева, Г. А. Ажермачева, Е. М. Концегово, Я. И. Олькова, А. Н. Степаненко и др. Из зарубежных авторов исследованием тонкостенных металлических двутавровых балок занимались В. Фейрберн, М. Хуботт, В. Лилли, Ф. Турнор, Х. Мур, В. Уилсон, Р. Сатсвелл, С. Бергман, Х. Вагнер, С. Скан, и др.

Исходя из проведенного анализа опыта применения тонкостенных металлических и деревянных балок, сформулированы цели и задачи исследования.

Во **второй главе** рассмотрено новое конструктивное решение металлодеревянной тонкостенной двутавровой балки и результаты её численных исследований.

Металлодеревянная тонкостенная двутавровая балка (рис. 1, а) с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофров включает верхний 1 и нижний 2 пояса из древесины и тонкую металлическую стенку 3 с поперечными гофрами из оцинкованной стали. Соединение стенки с полками

выполнено на клею. Для обеспечения местной устойчивости в стенке выштампованы ортогональные гофры в виде полуцилиндра радиусом  $r$ , который является высотой гофра  $f$ . Гофры ориентированы в разные стороны относительно оси балки. В поясах балки выполнен пропил 5 и цилиндрические углубления 6, в которые вставлены плоские и гофрированные участки кромок стенки 3, при этом гофры 4 зафиксированы в углублениях 6 цилиндрическими нагелями 7.

В целях увеличения местной устойчивости стенки и сдвиговой жесткости металлодеревянной тонкостенной двутавровой балки разработан второй её вариант (рис. 1, б). Для повышения прочности нагельного соединения со стороны цилиндрического нагеля устанавливаются дополнительные крепежные элементы, по форме повторяющие фрагмент стенки, включающие гофр и плоские участки стенки с каждой его стороны. В цилиндрические углубления 6 вставлены плоские и гофрированные участки кромок стенки 3 и вставки 8, при этом гофры 4 и вставки 8 зафиксированы в углублениях 6 и цилиндрическими нагелями 7, выполненными на всю высоту балки.

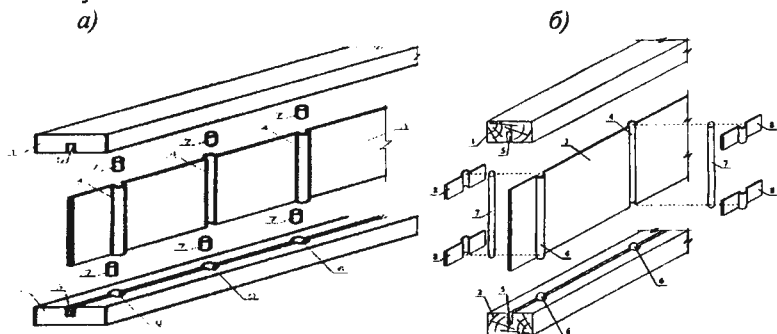


Рис. 1. Фрагменты балок в момент изготовления: а) тонкостенная металлодеревянная двутавровая балка с полуцилиндрическими гофрами; б) то же, усиленная дополнительными крепежными элементами

Соединения тонкой стенки с полкой выполнены на клею и усилены цилиндрическими нагелями, вставленными в заглабления в полках на клею. Все соединения деревянных конструкций являются податливыми, за исключением клеевых. Клеевые соединения прочны и монолитны, поэтому клеевые элементы рассчитывают как элементы цельного сечения. Таким образом, соединение полок со стенкой является жестким, что учтено при численном исследовании работы тонкостенной металлодеревянной балки и в аналитических расчетах.

Для численного и экспериментального исследования подобраны и выбраны сечения балок пролетом 3 м – высота сечения 300 мм принята из условия жесткости, пояса 100×40 мм – из условия прочности, стенка из

оцинкованной стали толщиной 0,7 мм – из условия предельной гибкости, равной  $\lambda_w = 400$ . Для обеспечения местной устойчивости стенки были выштампованы ортогональные полуцилиндрические гофры радиусом 20 мм с шагом 250 мм. В опорной зоне предусмотрено дополнительное ребро жесткости, установленное на расстоянии 120 мм от опоры. Физико-механические свойства приняты для поясов – по результатам экспериментального исследования образцов древесины на сжатие и изгиб, для стенки – по ГОСТ 14918. Численное исследование НДС проведено по программному комплексу «SCAD 11.1».

Построение модели велось в трехмерном пространстве  $oXYZ$  в масштабе 1:1. Для моделирования стальной стенки и полуцилиндрических гофров радиусом  $r = 20$  мм использовались плоские четырехузловые прямоугольные конечные элементы. Для моделирования поясов и опорных ребер из древесины использовались объемные восьмиузловые изопараметрические конечные элементы (КЭ-36). Расчетная схема по первой модели (PC-1) представляла балку с поясами из древесины и стенкой из тонколистовой оцинкованной стали, нагруженную сосредоточенной нагрузкой в  $1/3$  пролета, исполненную в виде конечно-элементной модели (рис. 2 а).

Расчетная схема по второй модели (PC-2) представляет собой ферму, пояса которой повторяют пояса балки, а стойка состоит из поперечного сечения гофра и устойчивой части стенки по обе стороны от него шириной  $0,65t_w\sqrt{E/R_y}$ . Площадь растянутых раскосов принимается вариантно: как из условия равенства угла сдвига стенки отсека решетчатого аналога, так и по методике балок с гибкой стенкой (рис. 2 б).

Численные исследования показали, что в тонких прямоугольных отсеках стенки между полками и ортогональными гофрами, в диагональном направлении образуются наклонные волны. Это подтверждается также и исследованиями работы балок с гибкой стенкой, проведенными другими авторами. Образование наклонных волн свидетельствует о переходе стенки в критическую стадию работы, а образовавшиеся наклонные гофры воспринимают растягивающие усилия от действия поперечных сил. Восприятие нормальных и перерезывающих сил происходит по типу решетчатой конструкции. Нормальные усилия воспринимаются поясами и устойчивой частью стенки вдоль поясов, а перерезывающие усилия – поперечными гофрами (стойками) и устойчивой частью стенки с обеих сторон, работающими на сжатие, и нисходящими раскосами, работающими на растяжение. Поэтому металлодеревянную балку можно представить как решетчатую балку, т.е. как ферму с параллельными поясами высотой равной высоте балки, которые повторяют пояса балки, а решетка включает



ет стойки и нисходящие раскосы, работающие на растяжение. Данная решетчатая ферма

Результаты численного исследования НДС тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки по двум расчетным моделям (РС-1 и РС-2) приведены на рис. 3. Расхождение нормальных напряжений в поясах составило 5,0 %, прогибов – 7 %, сдвига пояса относительно стенки – 4,5 %.

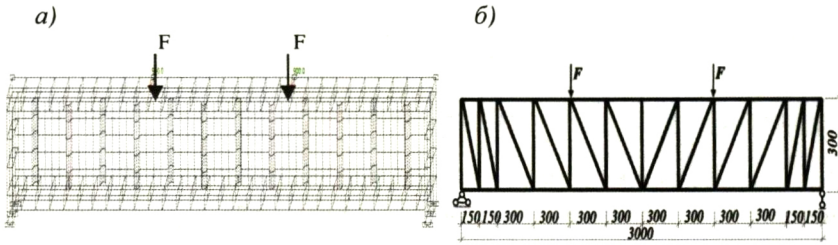


Рис. 2. Расчетные схемы балок: а) по первой модели; б) по второй модели

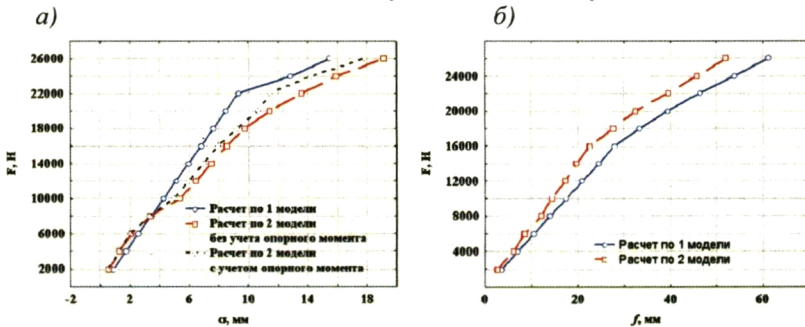


Рис. 3. НДС балки: а) напряжения в поясах балки б) прогиб балки

В третьей главе изложен аналитический метод определения НДС тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки.

Численные исследования показали, что в тонкостенных металлодеревянных балках, можно выделить три зоны работы: зона чистого изгиба, зона чистого сдвига и зоны, где одновременно действуют изгибающий момент и поперечная сила.

Расчет поясов металлодеревянной тонкостенной балки в условиях ее работы, близкой к чистому изгибу, выполняется на нормальные усилия сжатия и растяжения. Тонкая стенка между гофрами после образования диагональных волн работает в закритической стадии и практически не воспринимает нормальные напряжения, за исключением устойчивой части стенки, которая включается в состав сжатого пояса, как это допускается нормами для внецентренно-сжатых элементов. Пояс балки рассмат-

вается как неразрезная балка, лежащая на упругих опорах-гофрах, в которой кроме нормальных усилий возникают и изгибающие моменты. Нижний пояс балки рассматриваем как центрально-растянутый или внецентренно-растянутый элемент, а верхний пояс – как центрально-сжатый или внецентренно-сжатый элемент (сжато-изгибные элементы). Исходя из этого условия, определяем:

$$\text{прочность} \quad \frac{N}{A_f R_f + S \cdot t_w R_y} \leq 1,0; \quad (1)$$

$$\text{устойчивость} \quad \frac{N}{A_f R_c \cdot \varphi} \leq 1,0, \quad (2)$$

где  $N = M / v$  – продольное усилие;  $v$  – расстояние между центрами сечения поясов;  $S = 0,65 \cdot t_w \sqrt{E / R_y}$  – устойчивая часть стенки;  $t_w$  – толщина стенки;  $A_f$  – площадь поперечного сечения пояса;  $W_{расч}$  – расчетный момент сопротивления пояса, включая устойчивую часть стенки;  $R_f$  – расчетное сопротивление древесины, равное  $R_p$  – при работе на растяжение,  $R_c$  – при работе на сжатие и  $R_y$  – расчетное сопротивление материала стенки;  $\varphi = 1 - 0,8(\lambda/100)^2$ , но не менее 70;

Численные результаты исследования показали, что над ребрами жесткости в верхнем поясе тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки, над поперечными гофрами и в пролете между ними появляются дополнительные изгибающие моменты (рис. 4 а)

Значение дополнительного изгибающего момента над опорами предлагаем определять по аналогии работы балок с гибкой стенкой, но с учетом работы пояса из древесины. В закритической стадии работы стенки момент над гофрами равен

$$M_r = Q \cdot a \cdot \Phi_r, \quad (3)$$

где  $\Phi_r = 0,25 / \sqrt{D}$ ;  $D = EJ_w / (E_f J_f) \cdot \cos^4 \alpha$ ;  $\alpha$  – угол наклона диагонали отсека.

Прочность пояса с учетом опорного момента над гофрами определяем по формуле

$$\frac{N}{A_f R_f + S \cdot t_w R_y} + \frac{M \cdot k}{W_{расч} \cdot R_n} \leq 1,0, \quad (4)$$

где  $M_R = M / (\xi \cdot k_n)$  – изгибающий момент в расчетном сечении для балок, лежащих на упругом основании, от действия поперечных нагрузок над ребрами жесткости;  $k_n = \alpha_n + \xi(1 - \alpha_n)$ ,  $\alpha_n = 1,22$  – при треугольной эпюре,  $\alpha_n = 0,81$  – при прямоугольной эпюре;  $\xi = 1 - N / (\varphi \cdot R_c \cdot A_f)$  – коэффициент, учитывающий деформированную схему работы пояса,  $0 < \xi < 1,0$ ;  $k = R_p / R_n$ .

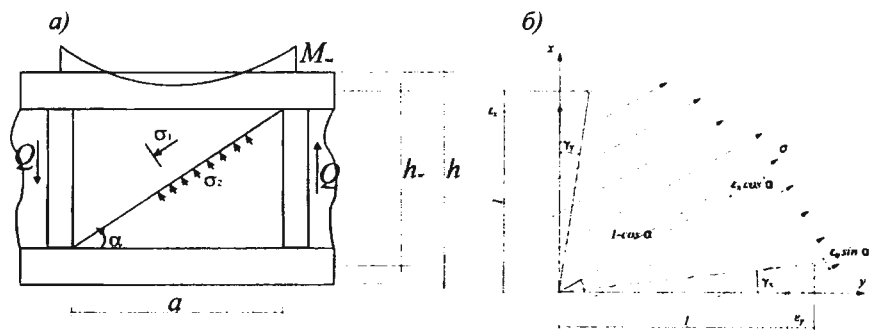


Рис. 4. Работа металлодеревянной балки в закритической стадии: а) моменты в поясах от действия поперечных сил; б) деформации стенки при образовании диагональных волн

Тонкая стенка представляет собой прямоугольную пластинку, защемленную полками и поперечными гофрами. Численные исследования, а также исследования работы балок с гибкой стенкой, проведенные другими авторами, показали, что при выпучивании пластинки образуются наклонные волны, близкие к прямолинейным. Рассмотрим виртуальный прогиб пластины по синусоиде. По С. П. Тимошенко и Б. М. Броуде, для пластинки с конечным отношением сторон прогиб имеет вид

$$\omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \cdot \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}. \quad (5)$$

Решая уравнение методом Ритца и аппроксимируя выражение для прогиба с помощью ряда, получаем критическое касательное напряжение для тонких пластин:

$$\tau_{cr} = \frac{9\pi^4 D (1 + \mu^2)^2}{32\mu^3 b^2 l \cdot \zeta}, \quad (6)$$

где  $\zeta$  – поправочный коэффициент, учитывающий работу стенки в закритической стадии;  $\mu$  – отношение ширины отсека к высоте в пределах  $(1 \dots 1,25)h_w$ .

$$\zeta = \sqrt{1 + \frac{81}{625} + \frac{81}{25} \frac{(1 + \mu^2)^2}{(1 + 9\mu^2)^2} + \frac{81}{25} \frac{(1 + \mu^2)^2}{(9 + \mu^2)^2}} \quad (7)$$

Устойчивость стенки обеспечена, если

$$\tau / \tau_{cr} \leq 1, \quad (8)$$

где  $\tau = Q / (l_w \cdot h_w)$ ;  $Q$  – поперечная сила в середине отсека.

При работе стенки в закритической стадии (рис. 4б) оси главных напряжений в отсеках смещаются относительно кромок на угол, равный  $\gamma_x$  и  $\gamma_y$ . Одно из этих напряжений является растягивающим, а другое –

сжимающим. Таким образом, создается система наклонных растягивающих усилий, уравновешенных реакциями поперечных ребер (гофров). Рассматривая эту модель как диагонально-растянутое поле, получим деформации по направлениям  $x$  и  $y$ :

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon \cos^2 \alpha + \varepsilon_y \sin^2 \alpha \\ \varepsilon_y = \varepsilon \sin^2 \alpha + \varepsilon_x \cos^2 \alpha \end{cases} \quad (9)$$

Принимая, что подкрепляющие ребра недеформируемые, т.е.  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ , получим  $\tau = 0,25E\gamma$ . Вводя понятие приведенного модуля сдвига  $G_1$ , характеризующего жесткость пластинки после образования наклонных волн, будем иметь:  $G_1 = \tau/\gamma = 0,25E$ . По отношению к начальному модулю сдвига  $G$  величина  $G_1$  составит:  $G_1 = G(1+\nu)/2$ . Для квадратных пластин, когда угол наклона диагонали равен  $45^\circ$ , а  $\nu = 0,3$ , получим модуль сдвига

$$G_1 = 0,65G. \quad (10)$$

Гофры рассматриваем как цилиндрические оболочки (рис.5). Основное уравнение устойчивости цилиндрических оболочек принимаем по А. С. Вольмиру и И. Г. Кильдибенко.

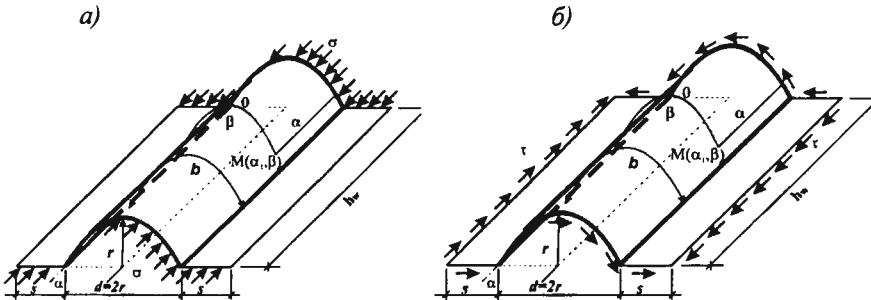


Рис. 5. Напряжения в гофре: а) нормальные; б) касательные

Выражение прогиба для шарнирно опертой оболочки имеет вид

$$w = f \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (11)$$

где  $m$  и  $n$  — числа полуволн образующей и по дуге.

Напряжение полуцилиндрических гофров не отличается от напряжений для цилиндрических оболочек. Принимая, что  $\alpha$  и  $\beta$  являются ортогональными координатами, совпадающими с линиями главной кривизны координатной поверхности, и рассматривая ее как цилиндрическую оболочку с радиусом  $R_2$ , используя гипотезу неделимых нормалей и прини-

мая  $1/R_1 = 0$ ,  $1/R_2 = 1/R_p$ , и решая уравнение устойчивости методом Бубнова – Галеркина, получим локальные критические нормальные и касательные напряжения вдоль гофра от поперечных нагрузок.

$$\sigma_{loc.cr} = 1,9(h_w / [2(r + S)])^2 R_y / \bar{\lambda}_w^2, \quad (12)$$

$$\tau_{cr.loc} = 12,9(h_w / [2(r + S)])^2 R_s / \bar{\lambda}_w^2. \quad (13)$$

Устойчивость гофра обеспечена, если выполняется условие

$$(\sigma_{loc} / \sigma_{loc.cr})^2 + (\tau / \tau_{cr.loc})^2 \leq 1, \quad (14)$$

где  $\sigma_{loc}$  – нормальное напряжение вдоль гофра от поперечных нагрузок с учетом устойчивой части стенки  $S$  с обеих сторон гофра,  $r$  – радиус гофра.

Прогиб металлодеревянной тонкостенной двутавровой балки с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофров с учетом изгибных и сдвиговых деформаций при условии равномерного распределения касательных напряжений равен

$$f = \sum \frac{\bar{M} M dx}{E_f I_f} + \sum \frac{\bar{Q} Q dx}{G_1 A_w}, \quad (15)$$

где  $\bar{M}$ ,  $\bar{Q}$ ,  $M$ ,  $Q$  – изгибающие моменты и поперечные силы соответственно от единичного усилия, действующего в направлении прогиба, и от нагрузки;  $I_f$  – момент инерции балки без учета стенки;  $E_f$  – модуль упругости материала пояса (древесины);  $G_1$  – модуль сдвига стенки при образовании наклонных волн по диагонали.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям, целью которых являлось изучение действительной работы, определение фактического напряженно-деформированного состояния и их сравнение с результатами численного и аналитического исследований. Эксперименты производились на опытных балках пролетом 3 м.

Всего было изготовлено и испытано шесть балок. Первое экспериментальное исследование было произведено в КГАСУ в лаборатории кафедры МКиС для балки пролетом 2,4 м, высотой 265 мм, сечением пояса 197×50 мм, высотой стенки 210 мм из оцинкованной стали толщиной 0,63 мм. Исследованием установлено, что восприятие перерезывающей силы происходит по типу решетчатой конструкции, т.е. с образованием частью стенки в зонах гофр стоек, работающих на сжатие, и нисходящих расколов, работающих на растяжение.

Для более подробного изучения работы тонкостенных металлодеревянных двутавровых балок в Поволжском государственном технологическом университете было проведено испытание пяти балок пролетом 3 м.

Для изготовления металлической стенки применена тонколистовая оцинкованная сталь по ГОСТ 14918. Механические свойства древесины

приняты по результатам испытания стандартными методами на сжатие и изгиб и установлено, что материал полок соответствует для первых двух балок 3-му сорту с расчетным сопротивлением  $R_f = 107 \text{ кг/см}^2$ , для 3-5 балок – 2-му сорту с  $R_f = 138 \text{ кг/см}^2$ .

**Первая балка.** Пояса балки изготовлены из деревянных брусьев сечением  $140 \times 40 \text{ мм}$  (ель, третий сорт), а стенка – из тонколистовой оцинкованной стали толщиной  $0,7 \text{ мм}$ , шириной  $260 \text{ мм}$ . На стенке балки выштампованы гофры, разделяющие её на 12 отсеков. Гофры полуцилиндрической формы диаметром  $40 \text{ мм}$ , шагом  $250 \text{ мм}$ . Гофрирование ребер жесткости выполнено в поперечном направлении с поочередной ориентацией влево и вправо относительно оси стенки. В опорной зоне на расстоянии  $120 \text{ мм}$  выштампованы дополнительные гофры. Соединение стенки с полкой на клее-герметике «Момент-Гермент» фирмы Henkel. Опорные ребра балки выполнены двумя деревянными брусками из сосны сечением  $40 \times 40 \text{ мм}$ , которые установлены с обеих сторон стенки и соединены нагелями между собой и полками.

**Вторая балка** выполнена аналогично балке № 1. В отличие от балки № 1 соединение стенки с полкой выполнено на эпоксидном клее ЭПД-универсал, первые гофры от опор (после дополнительного ребра) не усилены деревянными нагелями на всю высоту. Загружение балок № 1 и № 2 произведено равномерно распределенной нагрузкой (рис. 6, а).

**Третья балка** выполнена аналогично балке № 2. В отличие от балки № 2, пояса балки изготовлены из деревянных брусьев сечением  $100 \times 40 \text{ мм}$  (сосна второй сорт). Опорное ребро балки выполнено деревянными брусками из сосны сечением  $100 \times 40 \text{ мм}$  с пропилом шириной  $2 \text{ мм}$ , глубиной  $20 \text{ мм}$ , в который установлена металлическая стенка на эпоксидном клею. На балку приложена сосредоточенная нагрузка в  $1/3$  пролета (рис. 6, б и 7, б). Деформация стенки в отсеке при образовании диагональных волн приведена на рис. 4, б.

**Четвертая и пятая балки** выполнены аналогично балке № 3. В отличие от балки № 3, для обеспечения устойчивости поперечных полуцилиндрических гофров с другой стороны относительно стенки установлены полуцилиндрические дополнительные вставки. Вставка представляет полуцилиндрический гофр аналогичного диаметра и высоты с выштампованными гофрами на стенке, а также участка стенки шириной  $0,65t \sqrt{E/R_f}$  с обеих сторон.

Для испытаний разработана и изготовлена специальная экспериментальная установка (рис. 6). Усилия на загрузочную систему передаются при помощи гидравлического домкрата ДГ-10 грузоподъемностью  $10 \text{ тс}$ . Образцы установлены на шарнирные опоры. Первая балка нагружена рав-

номерно распределенной нагрузкой (рис. 6, а), к остальным балкам приложена сосредоточенная нагрузка на  $1/3$  пролета балки (рис. 6, б).



Рис. 6. Экспериментальная установка для испытания опытных балок  
а) распределенной нагрузкой; б) сосредоточенной нагрузкой, приложенной в  $1/3$  пролета

Прогибы измерены с помощью индикаторов часового типа ИЧ-50 с ценой деления  $0,01$  мм, закрепленных на штативе в середине пролета балки, а также при помощи прогибомера. Для определения напряженно-деформированного состояния на обе стороны полков наклеены электрические датчики сопротивления (тензорезисторы с тензочувствительностью  $201-202$  Ом), которые подключены к цифровой тензостанции АИД-4. Схемы загрузки образцов и расположения приборов приведены на рис. 7.

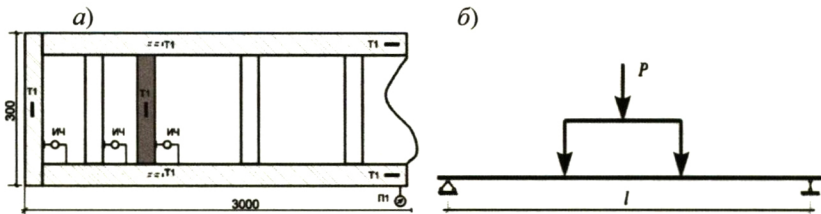
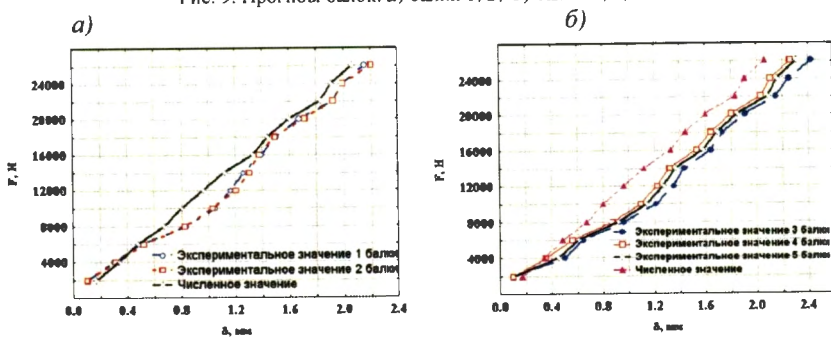
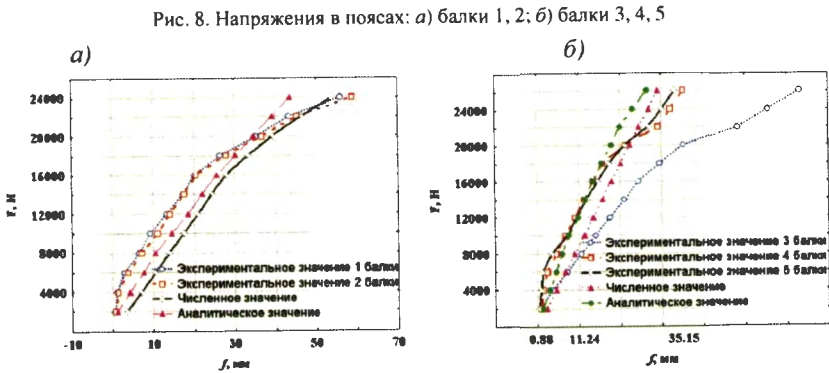
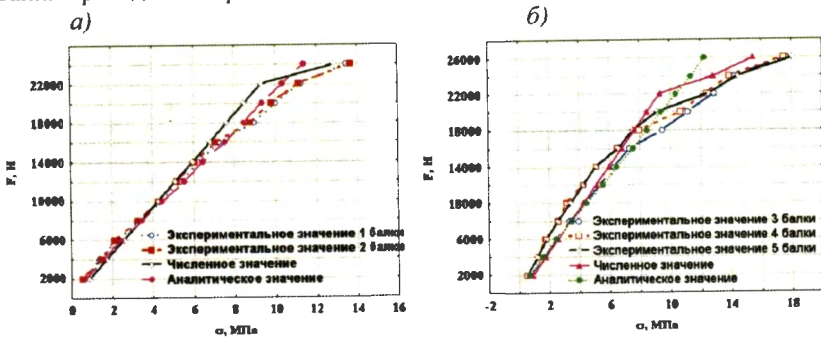


Рис. 7. Схемы расположения измерительных приборов (а) и загрузки экспериментальных образцов при сосредоточенной нагрузке на  $1/3$  пролета (б)

Во всех балках после упругой области работы произошло выпучивание стенки (хлопуны), но балки не теряли несущую способность. Истощение несущей способности в первых двух балках произошло из-за потери прочности верхнего сжатого пояса, а в балках 3,4,5 – из-за потери прочности нижнего пояса.

Результаты экспериментальных, численных и аналитических исследований приведены на рис. 8...10.





В пятой главе приведена технико-экономическая оценка вариантов балок. Техничко-экономическая оценка (ТЭО) производилась по таким показателям, как расход материала, трудоемкость изготовления и стоимость конструкции на франко-складе назначения.

Для ТЭО рассмотрены деревянные, металлические и металлодеревянные разрезные балки пролетом 6 м.

Для сравнения ТЭО произведен подбор сечений для покрытия здания пролетом 6 м. для г. Йошкар-Ола. Цены на древесину и на металл приняты по прейскуранту на ноябрь 2012 г. для г. Йошкар-Ола.

Для ТЭО приняты следующие варианты балок покрытия:

1 – клееные деревянные балки; 2 – деревянные балки с клефанерной стенкой; 3 – тонкостенные металлические балки с гофрированной стенкой; 4 – тонкостенные металлодеревянные балки с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофр; 5 – балки Деревягина с нагельными соединениями.

Основные результаты ТЭО всех вариантов балок приведены на рис 11-12.



Рис. 11. Гистограмма массы конструкции



Рис. 12. Гистограмма распределения стоимости конструкции

### Общие выводы

1. Результаты анализа методик расчета и конструкций деревянных и металлических балок показали целесообразность применения тонкостенных металлодеревянных двутавровых балок. Предложено новое конструктивное решение тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофров, подтвержденное двумя патентами Российской Федерации.

2. Численные исследования работы, аналитические расчеты и результаты имитационного моделирования показали, что тонкостенную металлодеревянную двутавровую балку можно рассчитывать как балку с гибкой стенкой (при работе стенки в упругой области) и как ферму с параллельными поясами и решеткой, включающей стойки и нисходящие раскосы (при работе стенки в закритической стадии). Оценка напряженно-деформированного состояния балок, рассчитанных по указанным моде-

лям, показала, что сходимость между ними в упругой зоне работы стенки находится в пределах 95..97 %, в закритической стадии – 86..88 %.

3. Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния тонкостенных металлодеревянных двутавровых балок с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофров, с учетом конструктивных особенностей; уточнены зависимости для расчета несущей способности полок, устойчивости тонких стенок и полуцилиндрических гофров с учетом их работы в закритической стадии.

4. Разрушение экспериментальных балок произошло вследствие потери несущей способности поясов при действии нагрузок превышающих расчетную нагрузку  $F = 16000$  Н: для балок № 1 и 2 в 1,38 раза; балки № 3 в 1,57 раза; балок № 4 и 5 в 1,62 раза.

5. В упругой области в балках с гофрами полуцилиндрической формы, усиленных дополнительными вставками, прогиб составил 10,75 мм, сдвиг полки относительно стенки – 0,89 мм, что меньше чем у балок с гофрами полуцилиндрической формы на 25,8 % и 6,7 %, соответственно.

6. Экспериментальные исследования показали, что при расчетной нагрузке  $F=16000$  Н нормальные напряжения в поясах балок меньше аналитических на 6 %, численных – на 10 %. Прогiby балок меньше аналитических на 7,5 %, численных – на 18 %. Значения сдвига стенки относительно полки больше численных – на 23,6 %.

7. По напряженно-деформированному состоянию балки с гофрами полуцилиндрической формы, усиленные дополнительными крепежными элементами-вставками, эффективнее балок с гофрами полуцилиндрической формы: по прочности – на 27,6 %; по жесткости – на 15,4 %.

8. Проведенные технико-экономические сравнения различных типов балок выявили эффективность предлагаемых тонкостенных металлодеревянных двутавровых балок по таким критериям как материалоемкость (64,95...82,45%), стоимость конструкции (29,7...92,19 %) по сравнению с рассмотренными: клееными деревянными балками, деревянными балками с клефанерной стенкой; тонкостенными металлическими балками с гофрированной стенкой; тонкостенными металлодеревянными балками с ребрами жесткости в виде полуцилиндрических гофр; балками Деревягина с нагельными соединениями.

**Основное содержание работы опубликовано в 18 работах:**

**– в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Кузнецов, И.Л. Разработка и исследование металлодеревянной двутавровой балки / И.Л. Кузнецов, А.А. Актуганов, А.П.Трофимов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – Казань: КГАСУ, 2010. – С. 117-121.

2. Кузнецов, И.Л. Разработка и исследование металлодеревянной двутавровой балки с цилиндрическими ребрами жесткости, усиленными дополнительными крепежными элементами / И.Л. Кузнецов, А.А. Актуганов, А.Н. Актуганов,

В.Г. Котлов, // Приволжский научный журнал: сб. статей № 4. Н. Новгород: НГАСУ, 2012. – С. 47-54

– патенты РФ:

3. Патент РФ № 2382855, МПК E04C 3/29. Металлодеревянная двутавровая балка / И.Л.Кузнецов, А.А.Актуганов, А.П.Трофимов .RU 2382855C1; заявл. 12.12.2008, опубл. 27.02.2010. Бюл. № 6. – 6 с.

4. Патент РФ № 2441120, МПК E04C 3/292. Металлодеревянная двутавровая балка / И.Л. Кузнецов, А.Н. Актуганов, А.А. Актуганов, А.П. Трофимов – RU 2441120C1; заявл. 25.05.2010, опубл. 27.01.2012. Бюл. №3.– 5 с.

– в других изданиях:

5. Актуганов, А.А. Деревянные балки с тонкими металлическими стенками /Актуганов А.А. // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы Международной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Ч. 3.– Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009.– С. 114-115.

6. Актуганов, А.А. Деревянные балки со стенками из тонких оцинкованных листов / А.А. Актуганов, И.Л. Кузнецов, А.Н. Актуганов // Наука в условиях современности: науч.-техн. конф. проф.-преп. состава, докторантов, аспирантов, сотрудников МарГТУ: сб. статей.– Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – С. 152-155.

7. Актуганов, А.А. Металлодеревянная тонкостенная балка / А.А. Актуганов, И.Л. Кузнецов, А.Н. Актуганов // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов – 2009: межвузовский сборник научных статей. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009.– С. 29-31.

8. Актуганов, А.А. Теоретические предпосылки расчета устойчивости стенок металлодеревянной тонкостенной балки / А.А. Актуганов, И.Л. Кузнецов, А.Н. Актуганов // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов – 2009: межвузовский сборник научных статей. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – С. 32-35.

9. Актуганов, А.А. Устойчивость стенки металлодеревянной тонкостенной балки /А.А. Актуганов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы Международной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Ч. 3.– Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – С. 116-117.

10. Актуганов, А.А. Экспериментальное исследование металлодеревянной тонкостенной балки / А.А. Актуганов // Наука в условиях современности: науч.-техн. конф. проф.-преп. состава, докторантов, аспирантов, сотрудников МарГТУ: Сб. статей – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. – С. 161-164.

11. Актуганов, А.А. Новая металлодеревянная балка / А.А. Актуганов // Строительная наука 2010: материалы международной научно-технической конференции / под общ. ред. д-ра техн. наук В.Н. Ланцова. – Владимир: Владимир. гос. ун-т, 2010. – С. 19-21.

12. Актуганов, А.А. Исследование работы тонкостенных металлодеревянных двутавровых балок с ребрами жесткости, выполненных в виде цилиндрических гофр /А.А. Актуганов // Научному прогрессу – творчество молодых: Материалы международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Ч. 3. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С. 97-98.

13. Актуганов, А.А. Работа и расчет металлодеревянных двутавровых балок, укрепленных полуметаллическими поперечными ребрами / А.А. Актуганов, И.Л.

Кузнецов, А.Н. Актуганов // Исследования, технологии, инновации, ежегод. науч.-техн. конф. проф.-преп. состава, докторантов, аспирантов, сотрудников МарГТУ. Сб. статей. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С. 242-245.

14. Актуганов, А.А. Тонкостенная металлодеревянная двутавровая балка / А.А. Актуганов, И.Л. Кузнецов, А.Н. Актуганов // Россия в глобальном мире: вызовы и перспективы развития: Четырнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием: в 2 ч. / под общ. ред. проф. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 231-232.

15. Актуганов, А.А. Тонкостенная металлодеревянная двутавровая балка с ребрами жесткости в виде цилиндрических гофр / А.А. Актуганов, И.Л. Кузнецов, А.Н. Актуганов // Инновационные ресурсы и национальная безопасность в эпоху глобальных трансформаций: Пятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием: сб. статей: в 2 ч – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. – Ч. 2 – С. 135-136.

16. Актуганов, А.А. Анализ расчетных схем металлодеревянной двутавровой тонкостенной балки / А.А. Актуганов, И.Л. Кузнецов, А.Н. Актуганов, О.А. Актуганов // Исследования, технологии, инновации: сб. статей. науч.-техн. конф. проф.-преп. состава, докторантов, аспирантов, сотрудников ПГТУ. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2012. – С. 143-145.

17. Актуганов, А.А. Методика расчета тонкостенных металлодеревянных двутавровых балок / А.А. Актуганов, И.Л. Кузнецов, В.Г. Котлов, А.Н. Актуганов, О.А. Актуганов. // Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012»: сборник научных трудов SWorld. – Т. 30, вып. 3. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – С. 53-63.

18. Актуганов, А.А. Расчет поясов тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки / А.А. Актуганов И.Л. Кузнецов, В.Г. Котлов, А.Н. Актуганов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы I международной (VII Всероссийской) конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 35-42.







10-